

黄海气旋数值模拟的可视化*

王洪庆 张焱 陶祖钰

(暴雨监测和预测国家重点实验室, 北京大学地球物理系, 北京 100871)

Ying-Hwa Kuo Wei Huang

(National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado 80307, USA)

提 要

对一次黄海气旋数值模拟进行了可视化研究, 给出了气旋云系、锋面、流场、涡度场的立体图像, 展示了可视化软件 Live View 在数值模拟研究中有广阔的应用前景.

关键词: 气旋 可视化 锋面立体图像 流场三维结构

引 言

现代大气数值模式可相当逼真的再现大至全球大气环流, 小至对流风暴的各种不同尺度的大气运动系统. 由于数值模式输出的模拟大气具有很高的时、空分辨率, 因此在研究大气运动系统的演变和内部结构方面是其它方法所不能替代的. 但是, 数值模式输出的资料量非常巨大, 往往高达数百兆, 甚至上千兆字节, 如何分析如此巨大的数据, 成为能否充分发挥数值模式优势的关键. 90 年代以来迅速发展的计算机可视化技术, 如 Vis-5D^[1], 可快捷地将多变量三维数据集的空间分布由多个水平、垂直剖面及立体图像生动地展示出来, 为分析数值模拟结果提供了有力的工具. 北京大学暴雨监测和预测国家重点实验室经过多年努力开发了一个可在微机上运行的可视化系统 Live View^[2]. 它可以展示标量和矢量三维数据的空间分布. 展示的方式, 不仅可用多个不同位置的水平和垂直剖面上的等值线分布或色彩分布, 也可用三维等值面的空间形状和给空间网络点上变量的不同数值赋予不同的颜色和透明度的三维数据体. 另外, Live View 还有自动产生空气质点三维运动的空间轨迹等多种功能, 非常适用于分析大气中的三维运动. 本文应用可视化系统 Live View, 展示出一个在黄海强烈发展的气旋三维结构.

1 概 况

1993 年 6 月初黄海发生了一次强烈的气旋过程. 6 月 1 日 00:00 UTC 位于长江下游的一个低压向东北偏东方向移动, 于 12:00 UTC 移入黄海, 中心气压从 998 hPa 降低到

* 本文由“攀登 95-专-03 项目”和“国家自然科学基金 49735180 项目”资助.
1999-03-08 收到, 1999-05-24 收到修改稿.

12:00 UTC 的 991 hPa. 6 月 2 日 00:00 UTC 中心气压进一步下降到 983 hPa. 到 12:00 UTC 已越过朝鲜半岛中部到达朝鲜东海岸, 中心气压下降到 980 hPa. 36 h 中, 气旋的最低气压下降了 18 hPa. 这是在初夏我国东部沿海少见的强烈发展气旋. 在 6 月 2 日 00:00 UTC 的红外云图上, 这个气旋具有非常典型的成熟锢囚气旋的逗点状云系特征(见图 1). 虽然这个气旋最强时的中心位于海上, 但由于黄海三面有陆地围绕(朝鲜半岛、辽东半岛、山东半岛), 有相当密集的地面和高空观测记录, 为数值模拟提供了比较好的资料条件.

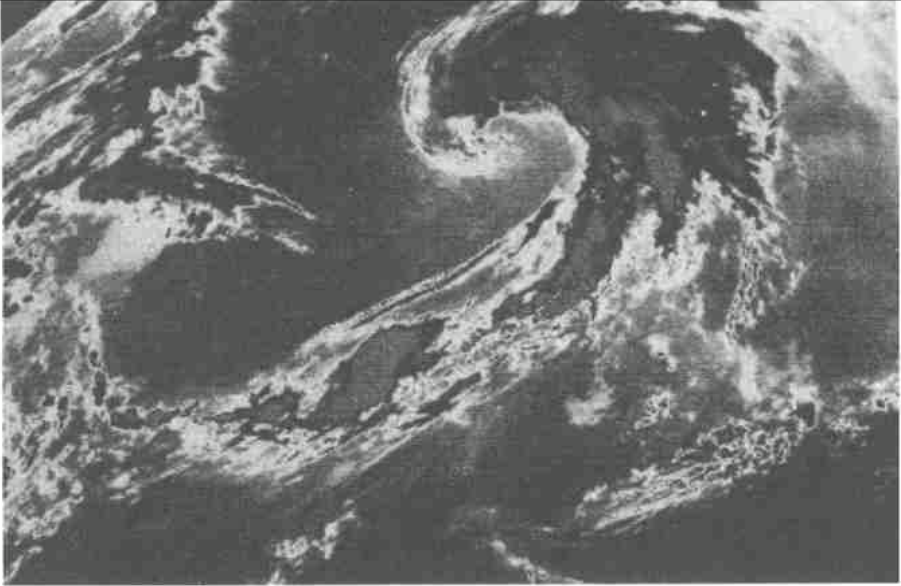


图 1 1993 年 6 月 2 日 00:00 UTC GMS 卫星红外云图

我们利用美国大气研究中心(NCAR)的中尺度数值模式 MM5 对这个气旋进行了数值模拟. 从 6 月 1 日 00:00 UTC 开始积分 36 h. 网格距为 54 km, 网格数为 81×97 . 垂直方向为 27 层. 采用了 Kain-Fritsch 对流参数化方案. 每小时输出一次模拟结果, 其中包括显式降水过程中的云水、雨水和冰水的三维数据.

数值模拟结果 6 月 1 日 12:00 UTC 到 2 日 00:00 UTC 气旋中心气压从 988 hPa 下降到 974 hPa, 在这 12 h 中气旋加深的速率超过了 1 hPa/h, 其发展速度达到暴发性气旋的水平. 图 2 给出模式计算出的气旋中冰水含量为 0.1 g/kg 的等值面三维图像, 它和卫星观测到的气旋逗点状云系非常相似, 说明数值模拟是相当成功的. 特别值得指出的是, Live View 所产生的气旋云系的冷云顶表面三维图像清楚地展示出气旋逗点云系的三个组成部分: 斜压叶云区、锋面云带、勾状云区^[3,4]. 由斜压过程产生的叶状云区位于气旋东北部的暖锋上方, 其云顶最高; 勾状云区位于气旋中心的西北侧并向西南伸展, 三维图像清楚地展示出其云顶高度明显的低于斜压叶; 冷锋云带一直延伸到华南沿海, 云带的冷空气一侧很陡峭, 云带上有一个个突起的与中尺度对流相联系的冷云顶. 图中还给出了 5 km 高度水平剖面上的流场, 以展示强烈发展的气旋和高空扰动的联系.

2 锋面立体图像

80年代外热带气旋的研究发现^[5],海洋上气旋强烈发展过程中存在所谓“T-bone”特征的锋面结构.如图3所示,气旋的强烈发展使暖锋向气旋中心的后方(即向西)弯曲,暖空气和冷空气都向气旋中心卷入,在气旋的中心部分形成暖核和狭窄的干冷缝.这一发现将挪威学派气旋模式中的锢囚锋结构修改为一条向后弯曲的暖锋,即气旋中心部位并不存在因冷锋赶上暖锋成为水平温度梯度很小的锢囚锋,而是一条因后弯而变得非常狭窄的具有很大温度梯度的暖锋.

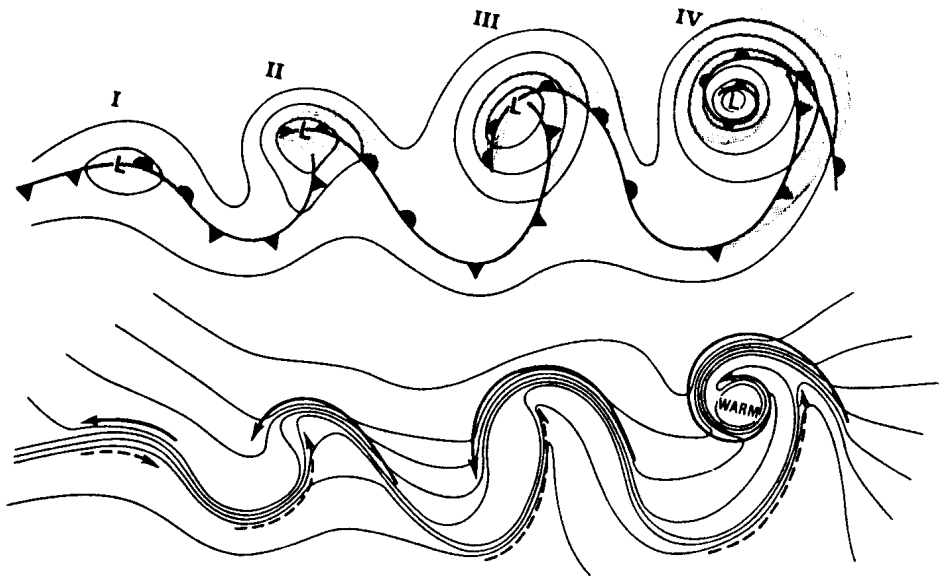


图3 外热带海洋锋面气旋生命史(I)初始锋面气旋(II)锋面断裂
(III)后弯暖锋(IV)暖核隔离(引自文献[5]中的图10.27,
上图为海面气压场,下图为温度场,图中实矢线为冷气流,虚矢线为暖气流)

为了给出气旋中锋面的立体图像,我们用 Live View 制作了相当位温为 325 K 的等值面三维图像(图4).从图4可以清晰的看到,冷、暖锋的坡度有明显的不同,冷锋的坡度非常陡.特别是冷、暖锋在气旋的中心部位并未重合,一条狭窄的干冷区向后一直卷入到气旋的中心,形成一条干缝.

3 流场三维结构

为了给出气旋流场三维结构,我们在一幅图像(图5)中同时给出数值模拟的 1.5 km 高度的风矢量场、12.0 km 高度的流场、风速为 50 m/s 的等值面、两个南北方向垂直剖面上的等风速线分布及整个三维空间的风速数据体.图中低空风矢量场展示了中气旋的涡

旋状风场和锋面附近的风场切变. 三维风速等值面形象地展示出与地面气旋相联系的高空急流的管状结构, 两个急流管分别位于高空波动的槽前和槽后. 用不同色彩表示的风速值在三维空间的分布, 展示出急流管内部的风速值非常大(鲜红色). 在急流管外, 颜色由黄色逐渐转变为兰色, 表示风速值由大到小的变化. 两个垂直剖面上的等风速线分布, 进一步对风速值的三维分布作出定量的表示.

图 6 进一步给出了与三维流场相配合的正涡度分析, 同时给出 1.5 km 和 9.0 km 高度的风场剖面. 图中黄色为 $17 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的相对涡度等值面立体图像, 展示了高空槽区和低空闭合涡旋区分别为两个大的近于圆形的正涡度区. 从这两个正涡度区中向东北和西南延伸的两条带状正涡度区, 分别与高空急流左侧的强风速切变和低空锋面附近风向的气旋式切变相联系. 特别有意义的是, 图中显示出气旋中的强正涡度区明显的分为高、低空两部分, 而对流层中层是一个涡度的相对小值区. 根据天气动力学的质量补偿原理, 对流层中部应存在一个无辐散层. 由涡度方程可知, 涡度的产生率和散度有关, 由于对流层中部的散度最小, 所以涡度场也最弱. LiveView 所展示的气旋三维流场所对应的涡度分布很好地揭示出锋面气旋中涡度空间分布的这个基本特征.

4 结 语

通过对一次黄海气旋数值模拟结果的可视化研究, 成功地揭示出气旋逗点状云系和“T-bone”状锋面的结构、三维流场中的管状高空急流及高低涡度的分层结构. 上述结果表明, 三维可视化技术可将数值模拟输出的大型数据集用内容丰富的图像生动地展示出来, 它不但是分析数值模拟结果的有力工具, 而且对加深天气系统空间结构的科学认识也有很大的帮助.

致谢: 感谢美国国家大气研究中心科学计算部(SCD)和中小尺度模式部(MMM)对暴雨监测和预测国家重点实验室的邀请, 使本工作得以完成.

参 考 文 献

- 1 Hibbard W. Visualizing large data set in the earth science. *IEEE Computer*, 1989, **22**(8): 53~ 57.
- 2 王洪庆, 张焱, 陶祖钰, 陈受钧. 三维大型复杂数据集计算机可视化. *自然科学进展*, 1998, **8**(6): 742~ 747.
- 3 Carlson T N. Air flow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**(10): 1498~ 1509.
- 4 Kuo Y H, Reed R J, Low-Nam S. Thermal structure and air flow in a model simulation of an occluded marine cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**(10): 2280~ 2297.
- 5 Newton E C, Holopainen E O. *Extratropical Cyclones—The Erik Palmén Memorial Volume*. Boston: Amer. Meteor. Soc., USA, 1990. 167~ 191.

VISUALIZATION OF THE NUMERICAL SIMULATION OF A YELLOW SEA CYCLONE

Wang Hongqing Zhang Yan Tao Zuyu

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Ying-Hwa Kuo Wei Huang

(National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado 80307, USA)

Abstract

The results of the numerical simulation of a Yellow Sea (Huanghai Sea) cyclone was examined by the visual software LiveView. The structures of the cloud system, front, stream field and vorticity were presented by the stereo images. It shows that the visual software of LiveView is a powerful tool to examine the modeling output.

Key words: Cyclone Visualization Front stereo image 3-D structure of stream field